钠冷快堆蒸汽发生器钠侧入口流量分配特性研究

王博[1,2]　郭硕[1]　张大林[1]　田文喜[1]　秋穗正[1]　苏光辉[1]

1（西安交通大学 核科学与技术学院 陕西 西安 710049）

2（东方电气集团 核电事业部 四川 成都 610036）

摘要　我国将钠冷快堆技术作为未来核能技术的重要发展方向，蒸汽发生器作为我国示范快堆（CFR600）的核心部件，其热工水力性能对反应堆的整体效率和安全性至关重要。然而，钠冷却剂流量分配不均的问题主要由均流栅格设计、进口窗结构、环形通道宽度、入口接管高度和钠冷却剂入口流量等因素引起，这不仅影响热交换效率，还会导致系统不稳定。因此，研究基于计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）数值仿真方法，对钠侧入口流量分配的影响因素进行了参数敏感性分析，揭示了均流栅格和进口窗设计对流量分配的影响规律，并提出了优化方案和流量分配非均匀度的评价指标非均匀度常数。研究结果显示，在优化设计后，均流格栅高度确定为 1200 毫米，进口窗结构采用 1-4 排开孔数量 40，5-8 排开孔数量 30，9-11 排开孔数量 24。虽然流量分配装置会在一定程度上增加了流动过程中的压力损失，但整体上改善了蒸汽发生器的流动特性，使最大相对径向速度范围控制在 120-150%区间内，最大非均匀性指数降至 0.35 以下。此研究成果为 CFR600 蒸汽发生器的设计优化提供了理论依据。

关键词　示范快堆；蒸汽发生器；流量分配；计算流体力学；设计优化

中图分类号　TL99

CSRT:

Sodium side inlet flow distribution characteristics of the steam generator in China Demonstration Fast Reactor

WANG Bo[1,2]　GUO Shuo[1]　ZHANG Dalin[1]　TIAN Wenxi[1]　QIU Suizheng[1]　SU Guanghui[1]

1(*School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiao Tong University,, Xi'an 710049, China*)

2(*Nuclear Equipment Design Institute, Dongfang Electric Corporation Limited, Chengdu 610097, China*)

Abstract　[Background] The sodium-cooled fast reactor China Demonstration Fast Reactor (CFR600) represents one of the most promising directions for the future of nuclear energy in China, providing advantages such as efficient fuel utilization, higher breeding potential, and enhanced safety features. As a critical component of CFR600, the steam generator plays a pivotal role in ensuring efficient heat transfer and maintaining the overall stability of the reactor system. However, one of the major challenges encountered in sodium-cooled fast reactors is the non-uniform distribution of coolant flow. This issue can significantly affect the thermal-hydraulic performance

第一作者：王博，男，现为博士研究生，研究领域：核反应堆热工水力
通信作者：张大林，E-mail: dlzhang@xjtu.edu.cn
收稿日期：2024-00-00，修回日期：2024-00-00
First author: WANG Bo, male, doctor student, focusing on thermal-hydraulics of nuclear reactor
Corresponding author: ZHANG Dalin, E-mail: dlzhang@xjtu.edu.cn

of the steam generator and may compromise the operational safety of the reactor system. The uneven flow distribution is influenced by multiple design and operational factors, including the configuration of the flow equalizing grids, the structure and positioning of the inlet windows, the width of annular channels, the height of inlet nozzles, and the coolant flow rate. Therefore, optimizing these design parameters is crucial for improving the efficiency and reliability of the steam generator. [Purpose] This study investigates the sodium-side flow distribution in the CFR600 steam generator and optimizes the flow equalizing grid and inlet window design to improve flow uniformity and thermal-hydraulic performance. [Methods] A Computational Fluid Dynamics (CFD) approach was employed using ANSYS CFX to perform steady-state simulations of the sodium-side inlet section of the steam generator. To ensure accurate and efficient simulations, a grid independence study was first conducted, which determined that a mesh size of 7.25 million elements was sufficient to achieve reliable results while maintaining computational efficiency. The study then systematically examined the effects of three different flow equalizing grid heights and three distinct inlet window structures on sodium-side flow distribution. A parameter sensitivity analysis was conducted to evaluate the influence of these design factors on flow uniformity. Additionally, a dimensionless non-uniformity index was introduced as a quantitative metric to assess the degree of flow maldistribution within the system. [Results] The simulation results demonstrate that the optimal flow equalizing grid height is 1200 mm. Furthermore, the most effective inlet window design incorporates a combination of varying hole sizes and arrangements, which significantly improves flow uniformity. The implementation of flow equalizing devices markedly enhances both circumferential and axial flow uniformity in the sodium-side inlet region. Although these devices introduce a slight increase in pressure losses, they substantially improve the overall flow characteristics of the steam generator. Specifically, the maximum relative radial velocity is controlled within the range of 120–150%, and the maximum non-uniformity index is reduced to below 0.35. [Conclusions] This study confirms that optimizing the flow equalizing grid and inlet window structure can significantly enhance the uniformity of sodium coolant flow. These improvements contribute to better thermal-hydraulic performance, leading to higher efficiency and safer operation of the steam generator in CFR600. The findings provide valuable insights into the design optimization of sodium-cooled fast reactor steam generators, offering a theoretical foundation for future reactor developments and technological advancements in fast reactor design.

Key words CFR600, Steam Generator, Flow Distribution, CFD, Design Optimization

霞浦快堆示范项目是我国实现闭式核燃料循环计划的一部分，标志着快堆技术领域的重要进展。蒸汽发生器作为我国示范快堆的核心部件，其功能是将堆芯热量传递给二回路冷却剂并产生蒸汽，因此其性能直接影响反应堆的效率和安全性[1−2]。钠侧进出口流量分配不均不仅会造成蒸发器的壳侧流场的分布不均，局部横流速度的增大还会引起换热管的流致振动，影响蒸发器的结构安全性[3−4]。因此，优化蒸汽发生器的流量分配，提高热工水力性能，成为提升我国示范快堆整体运行效率和安全性的关键。

近年来，随着计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）技术的进步，蒸汽发生器的流动特性和流量分配问题得到了更加深入的研究[5-7]。其中，哈尔滨工程大学针对直流蒸汽发生器一二次侧耦合传热进行了全尺寸三维数值模拟[8]，此外上海交通大学开展了在不同热功率下的小型压水堆螺旋管式直流

蒸汽发生器全尺寸热工水力特性试验[9]，还有研究通过多孔介质方法对华龙一号压水堆 ZH-65 蒸汽发生器模拟体和压水堆 AP1000 蒸汽发生器的一次侧流量分配进行模拟，得到了一次侧温度、流量、能量和传热系数的分布规律[10]。但我国示范快堆蒸汽发生器采用管壳式直流蒸汽发生器，液态金属钠作为一次侧换热工质，因此其流量分配特性与传统压水堆蒸汽发生器相比存在差异。中国科学院上海应用物理研究所研究表明水力结构设计对流量分配起着决定性作用[11,12]。钠冷快堆蒸汽发生器传热管为均匀布置，在底部进口腔采用孔板进行均匀化流量分配，保证传热管内部流量分配的均匀性，在此设计下，外部的钠侧流量分配成为影响蒸汽发生器的关键因素，而决定钠侧流量分配的主要因素是进口窗和均流格栅。

本文通过 CFD 方法对我国示范快堆蒸汽发生器的钠侧流动分配进行仿真，初步分析了影响流量分配的各种因素，为后续的流量分配实验提供基础数据。流量分配实验结果将对我国示范快堆蒸汽发生器钠-水汽流动传热耦合样机综合实验验证提供理论依据，从而促进我国示范快堆的安全、高效运行。

1　研究对象与模型建立

我国示范快堆蒸汽发生器为立式蒸汽发生器，其优点在于二回路中没有停滞区且具有加热表面的吸热效率均匀的特征[13]。蒸汽发生器主要由蒸发器和过热器组成，其中两者的壳侧介质均为液态钠，管侧介质则分别为两相水和过热蒸汽。本研究对象为中国快堆示范项目我国示范快堆蒸汽发生器的钠侧流体流动。蒸发器钠侧流体由上部入口接管流入，由下部出口接管流出；过热器钠侧流体由下部入口接管流入，由上部出口接管流出[14-16]。在钠侧流体的流动过程中，蒸发器与过热器的钠侧入口区域在结构和流动形态上具有较高的相似性，使得蒸发器的流动特性能够代表蒸汽发生器钠侧流体的整体流动行为。

如果蒸汽发生器没有流量分配装置，钠冷却剂的流量将会出现显著的不均匀分布。这不仅会引发流体流动的不稳定性，如湍流或振荡等，影响系统的稳定运行，部分区域的流速过低还会导致局部过热，从而增加设备损坏的风险[17]。多孔板通常是缓解流量分布不均的首选方案，因为它成本低并且易于安装[18]。为了使钠在蒸汽发生器中能分布均匀，Nguyen[19]设计了一种多孔板，并使用数值模拟优化了多孔板的几何设计和位置，以轻微的压力损失为代价提高了流量分布均匀性。因此，我国示范快堆的设计中在钠侧入口设置了均流格栅和孔板型进口窗以改善进口区域的流量分配特性。研究对象包含均流格栅与钠侧进口窗，如图 1 所示。均流格栅和进口窗的开孔示意图如图 2 所示。

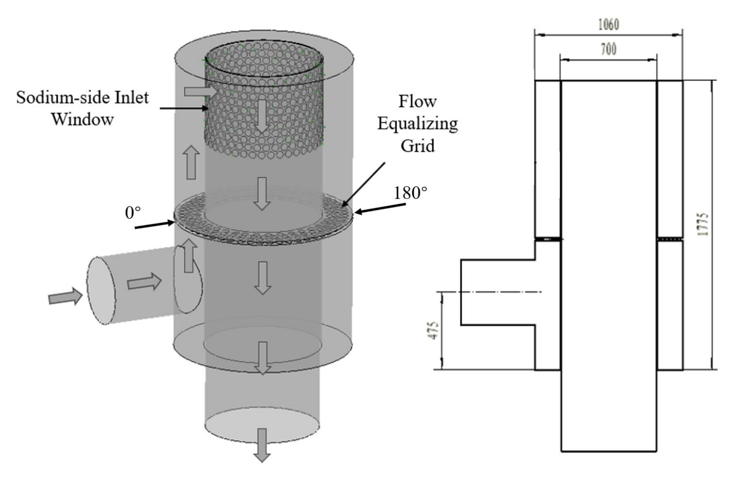


图 1　CFR 蒸发器钠侧入口模型

Fig.1 Sodium-side inlet model of CFR evaporator

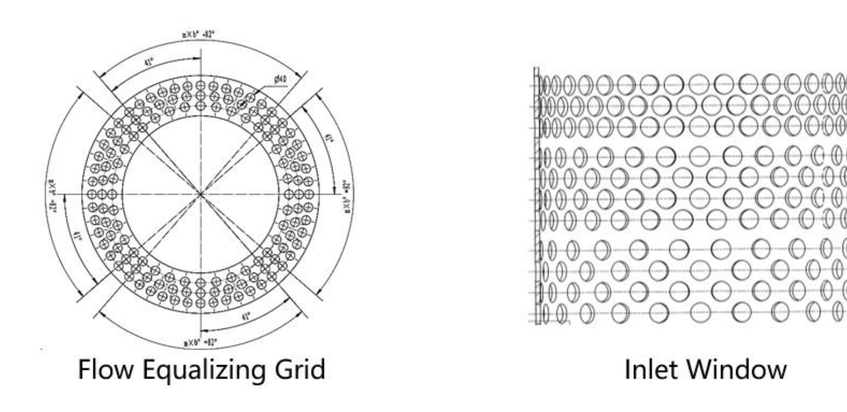


图 2 均流格栅与进口窗开孔结构示意图

Fig.2 Diagram of Perforation Structure for Flow Equalizing Grid and Inlet Window

其中，换热管排布呈周期性对称布置，考虑到模型的复杂性，根据流体动力学原理，引入相同阻力结构进行替代，因此模型未进行换热管结构的实际模型建立。考虑蒸发器中，钠侧流体沿进口窗进入内筒体，在进口窗区域存在较大的径向速度，随着流体往下流动的过程，径向流速逐步减小形成单一轴向流动，在一定程度上缩短内筒体高度不影响进口窗的流量分配特性，以及外筒体进口接管以下的区域流动缓慢，可视为流动死区，因此简化了外筒体在进口接管以下部分结构，并缩短了内筒体高度。

2 数学物理模型

2.1 CFD 控制方程及边界条件

为进行流量分配实验设计。本研究采用 CFD 方法对我国示范快堆蒸汽发生器的钠侧流动进行分析，实验过程中不考虑钠-水汽之间的热传递耦合，通常选用稳态计算模型，其控制方程如下：

质量守恒方程：

$$\nabla\cdot(\rho\mathbf{u})=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu(\nabla\mathbf{u}+\nabla\mathbf{u}^{T}))+f \tag{2}$$

其中，ρ 是钠的密度；$\mathbf{u}$ 是速度矢量矩阵；p 是压力；μ 是动力粘度；f 是体积力，包含了重力以及附加阻力，重力加速度为 9.81m/s^2。

根据 CFR600 的设计正常运行的工况，蒸发器钠壳侧入口接管雷诺数 4.43×10^6，入口环形通道雷诺数 1.05×10^6，均为湍流工况[20]，因此精确预测流体流动需要选择合理的湍流模型。剪切应力输运湍流模型（Shear Stress Transport Turbulence Model，SST）能够同时兼顾近壁区和自由流区的湍流行为，尤其适用于具有强烈梯度变化的系统[21]，因此计算选择使用 SST 模型描述钠的湍流行为，其控制方程如下：

k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}=P_k+\nabla\cdot((\mu+\sigma_k\mu_t)\nabla k)-\beta^{*}\rho\omega k \tag{3}$$

ω 方程：

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}=\frac{\gamma}{\nu_t}P_k+\nabla\cdot((\mu+\sigma_\omega\mu_t)\nabla\omega)-\beta\rho\omega^2+2(1-F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega2}}{\omega}\cdot\nabla k\cdot\nabla\omega \tag{4}$$

其中t为时间；k为湍动能；ω为比耗散率；P_k为湍动能生成项；F_1为混合函数；μ_t为湍流粘度；ν_t为涡粘性系数；β^*、σ_k、β、γ、σ_ω、$\sigma_{\omega2}$均为模型常数，这些参数的选择参考了 ANSYS CFX 软件中的默认值。

在考虑复杂几何形状和局部流动特性时，质量流量提供了更稳定的控制条件，根据设计工况，确定入口质量流量设置为 372.625kg/s。出口压力边界则反映了蒸汽发生器出口的环境条件，为确保计算结果与实际中的压力场一致，压力出口设置为 1.96MPa。

2.2 网格无关性验证

由于均流格栅及钠侧进口窗结构开孔多且不规则，不适宜建立六面体网格。因此分析模型统一采用四面体网格划分并对薄壁处边界层以及重点区域（均流格栅区域、进口窗区域）进行加密处理；对于壳侧腔室内部，在远离进口窗的地方设置较粗网格以节约计算时间[22]。CFD 计算需要确保计算结果不受网格划分的影响，从而保证结果的可靠性和准确性，同时合理的网格数量能够节省计算时间。当相邻两级网格计算得到的关键物理量的相对误差小于设定的 0.5%时，即判定已达到网格无关状态。表 1 给出了不同网格数量下的计算结果对比。可以得出，当网格数从 673 万变化到 822 万时，随着网格数的增加，进出口压降变化很小，说明分析模型所采用的 725 万网格已达到网格无关性要求。

表 1 不同网格数量计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results with different mesh quantities

体网格数量 Number of volume meshes	673w	725w	822w
网格质量 Mesh quality	>0.2	>0.2	>0.2
进出口压降 Inlet and outlet pressure drop	10085	10124Pa	10131Pa
相对误差 Relative Deviation	0.4%	\	0.06%

3 流量分配的影响因素分析

3.1 均流格栅高度对流量分配的影响

为了研究均流格栅高度对流量分配的影响，在三个不同高度处设置均流格栅进行对比分析，假设均流格栅开孔直径大小为42mm，各排开孔中心间距为45mm，每排开孔数 40，总开孔数 440，开口窗总高 470mm，格栅离进流腔室底部的高度分别为 800mm、1000mm、1200mm。

图 3 给出了均流格栅三种布置下钠侧进口窗周向各角度开孔平均质量流量M_{Ciri}与进口窗平均质量流量M_{Cir}的对比图。由图易得，随着均流格栅位置 h 的增高，周向进流逐步趋向于均匀；当 h=1200mm 时，其钠侧进口窗周向均匀度远高于其他两个位置；此时各角度开孔平均进流速度的最大值出现在 180°位置，约为平均质量流量的 1.3 倍。

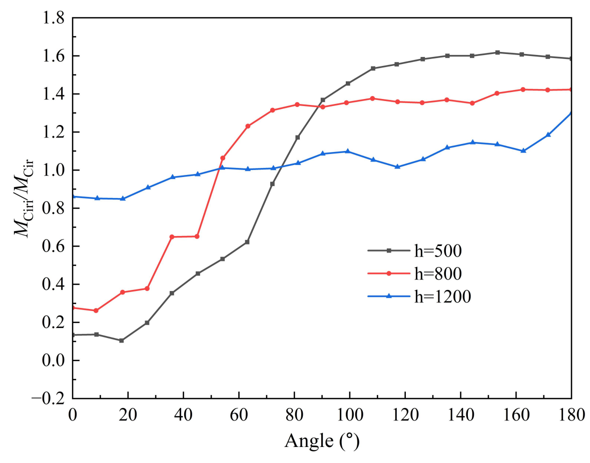
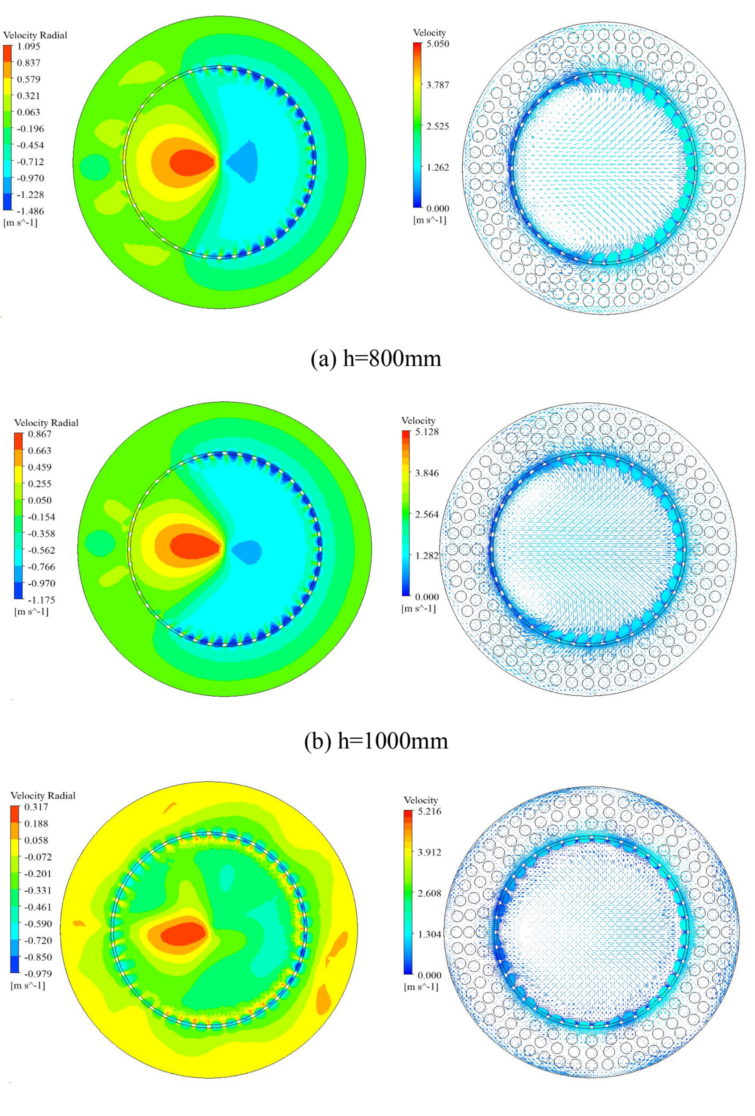


图 3 各角度开孔质量流量与平均质量流量之比

Fig. 3 Ratio of mass flow rate at each opening angle to average mass flow rate

图 4 给出了三种均流格栅布置下进口窗 1/2 高度处径向速度云图。从图中可以看出，当均流格栅位置 h=800mm 时，由于 180°进流速度过大，流体在 0°方向呈流出状态，钠窗的进流主要发生在 90°~180°范围；随着 h 值的逐步增大，180°方向的进流速度逐步减小，周向进流逐步趋于均匀；当 h=1200 时，0°方向不再出现流体流出。



(a) h=800mm

(b) h=1000mm

(c) h=1200mm

图 4 进口窗 1/2 高度处径向速度云图与速度矢量图

Fig. 4 Radial velocity contour and velocity vector diagram at 1/2 of inlet window

为对比钠侧流量在周向上的分配均匀性，定义无量纲非均匀度指数 NUI_{CIR} [23]：

$$NUI_{CIR}=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(m_{CIRi}-m_{CIR})^2/N}}{m_{CIR}} \tag{5}$$

其中 m_{CIRi} 为钠窗上每一列开孔的平均质量流量； m_{CIR} 为通过钠窗的平均质量流量； N 为开孔列数。当 NUI_{CIR} 时，流量分配绝对均匀；当 NUI_{CIR} 值越高，流量分配越不均匀。

表 2 进流孔周向均匀度 NUI_{CIR} 值对比

Table 2 Comparison of Circumferential Uniformity NUI Values for Inflow Holes

均流格栅位置 Position of the flow equalizing grid	NUI_{CIR}
h=800mm	0.596
h=1000mm	0.436
h=1200mm	0.115

表 2 给出了均流格栅三种布置下的钠侧进口窗进流孔周向非均匀度 NUI_{CIR} 值对比。当 h=1200mm 时，其周向质量流量非均匀度 NUI_{CIR} 远低于其他两个位置。因此，均流格栅结构的引入，有利于钠侧进口窗进流的周向均匀性；均流格栅位置离入口接管距离越远，由其结构引起的压损越小且钠侧进口窗周向均匀性越好。

3.2 进口窗结构对流量分配的影响

加入均流格栅流量分配装置改善了进口窗的流量分配情况，但在进口窗高度方向上还会存在不均匀性。因此需要进行进口窗不同开孔形式对进口窗流量分配的影响分析，并确定一种较为合理的进口窗结构。

为优化进口窗在高度方向上的流量分配均匀性，欲根据高度位置变化采用不同开孔率进口窗结构。开孔数量多的区域，流体流通面积大、流阻小，因此根据实际需求合理设计各区域进口窗开孔数量，采用开孔数量随高度位置增加而增加的结构能够更高效地优化流量分配的均匀性。进口窗设计以保证进口窗的整体高度、开孔直径不变为前提，减少进口窗下部区域开孔数量，设计进口窗结构 2、结构 3 参数如表 3 所示。

表 3 进口窗结构 1、结构 2 及结构 3 参数列表

Table 3 Parameter List of Inlet Window Structures 1, 2, and 3

行数 Rows	开孔数量（结构 1） Number of Holes (Structure 1)	开孔数量（结构 2） Number of Holes (Structure 2)	开孔数量（结构 3） Number of Holes (Structure 3)
1~4	40	40	40
5~8	40	36	30
9~11	40	30	24

为评估不同进口窗结构在高度方向上的流量分配均匀性，定义高度方向无量纲质量流量非均匀度常数 NUI_{axil} [23]:

$$NUI_{axil}=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(m_{axili}-m_{axiave})^2/N}}{m_{axilave}} \tag{6}$$

其中，m_{axili} 为经过钠窗每一排开孔的质量流量，单位是 kg/s；m_{axiave} ($m_{axiave}=\frac{m_{in}}{N}$) 为经过钠窗各排的平均质量流量，单位是 kg/s；m_{in} 钠窗进口总质量流量，N 为开孔排数。

表 4 给出了三种进口窗结构布置下钠侧进口窗高度方向非均匀度 NUI_{axil} 值对比。图 4 给出了三种进口窗结构布置下，钠侧进口窗各排开孔质量流量 m_{axili} 与各排平均质量流量 m_{axiave} 的对比。

由表 4 及图 5 可得，三种进口窗结构下，顶部进流量均小于底部。随着底部开孔率逐步降低，顶部质量流量逐步增大，底部质量流量逐步降低，进口窗高度方向上的流量分配逐步趋于均匀。此外，进口窗采用不同开孔数排列相较于相同开孔数，更有利于钠侧进口窗的高度方向的均匀性。在采用进口窗结构 3 时，进口窗在高度方向上的质量流量 m_{axili} 保持在[0.77 m_{axili} ,1.18 m_{axili}]范围内。

表 4　进口窗高度方向非均匀度 NUI_{axil} 值

Table 4 Non-Uniformity NUI_{axil} Values in the Height Direction of the Inlet Window

进口窗结构 Inlet window structure	NUI_{axil}
结构 1 Structure1	0.500
结构 2 Structure2	0.298
结构 3 Structure3	0.171

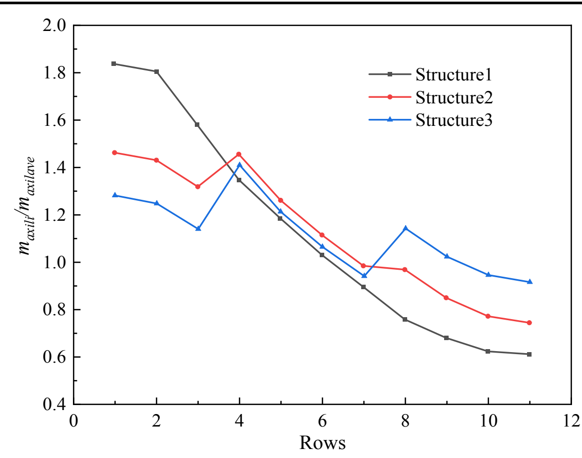


图 5 各排开孔质量流量 m_{axili} 与各排平均质量流量 m_{axiave} 之比

Fig. 5 Ratio of Mass Flow Rate in Each Row of Openings to the Average Mass Flow Rate of Each Row

3.3　流量分配装置效果

通过分析均流栅高度和进口窗结构对流量分配特性的影响研究，确定了一种较为合理的流量分配装置结构，使轴向和径向上流量分配都得到了均匀分布。为了进一步验证结构的合理性，本文对比了有无流量分配装置的压降及流量分配效果。

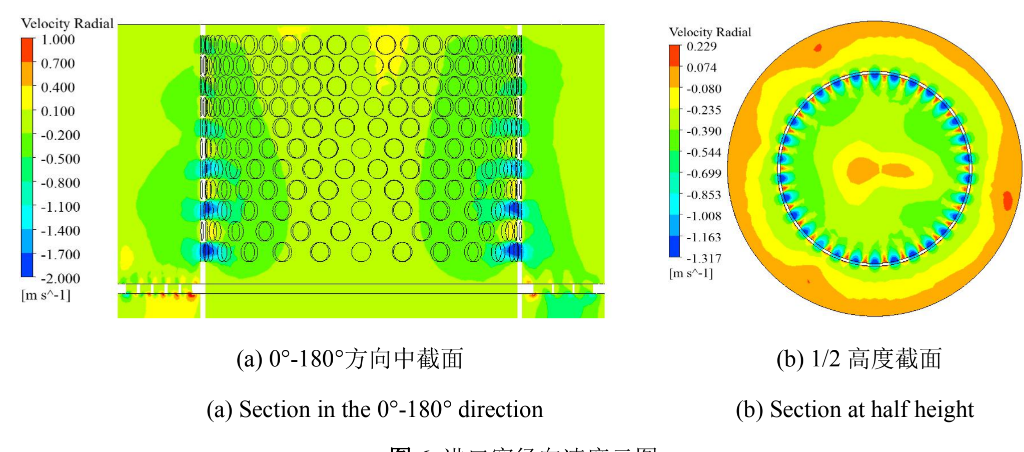
表 5 给出了设置流量分配装置前后进出口总压降。可以看出，安装流量分配装置在一定程度上增大了流动过程的压力损失。

表 5　总压降对比

Table 5 Comparison of Total Pressure Drop

类型 Type	压降 Pressure drop Δp
带流量分配装置 With flow distribution device	12360.00Pa
未添加流量分配装置 Without flow distribution device	8.13Pa

图 6 给出了进口窗区域 0°-180°方向中截面以及 1/2 高度截面的径向云图。从图 6(a)中可以看出：在该平面，整个进口窗在高度方向上趋于均匀；虽然进口窗底部在开孔位置出现了较大的径向速度，但随着流体向中心流动的过程，该速度迅速减小并趋于均匀。从图 6(b)中可以看出，在 1/2 高度处，整个平面各角度的进流速度趋于均匀。可以看出，流量分配装置较好的控制了进口窗流量分配情况。



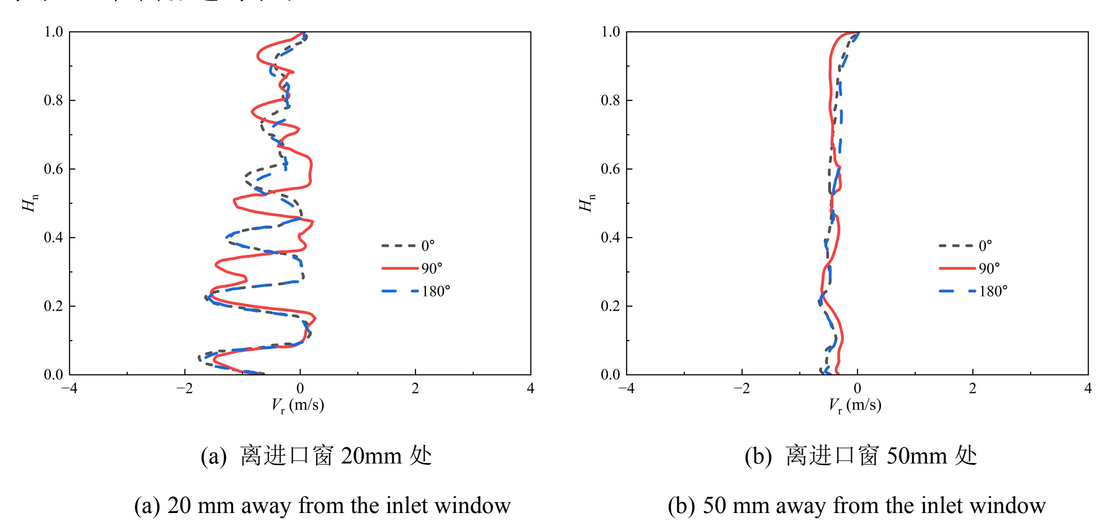
(a) 0°-180°方向中截面　　(b) 1/2 高度截面

(a) Section in the 0°-180° direction　　(b) Section at half height

图 6 进口窗径向速度云图

Fig. 6 Radial Velocity Contour of Inlet Window

图 7 给出了进口窗区域 0°、90°、180°方向径向流速对比。由图 7(a)可以看出：在径向离进口窗 20mm 位置，0°、90°、180°方向的径向流速分布在高度方向上呈增减渐变趋势，这主要是由于该位置离进口窗仅有 20mm，流体由进口窗上孔洞进入内腔室，流动还未充分发展，与开孔相对应位置的流速较大而与壁面相对应位置的流速较小。由图 7(b)可以看出：在径向离进口窗 50mm 位置，0°、90°、180°方向的径向流速分布更加均匀，且径向流速均小于 1m/s。



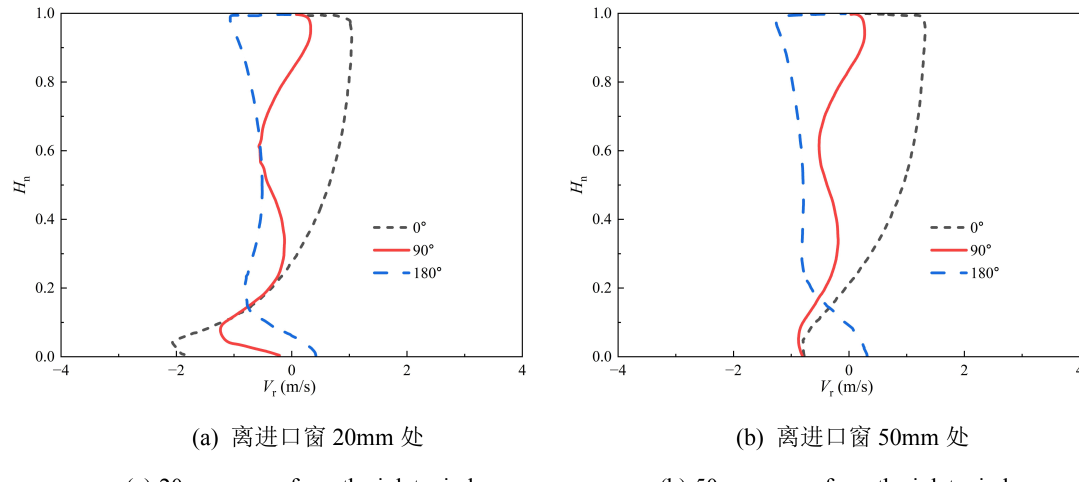
(a) 离进口窗 20mm 处　　(b) 离进口窗 50mm 处

(a) 20 mm away from the inlet window　　(b) 50 mm away from the inlet window

图 7 进口窗区域径向流速（带流量分配装置）

Fig. 7 Radial Flow Velocity in the Inlet Window Region (with Flow Distribution Device)

图 8 给出了未设置流量分配装置时，进口窗区域 0°、90°、180°方向径向流速对比。由图 8(a)可以看出，在 0°、90°、180°方向流量分配不均匀，且在 0°方向出现了较大的出流情况。由图 8(b)可以看出，随着流动往内腔室流动的过程，流量分配依旧不均。对比图 6 与图 7 可得，流量分配装置改善了进口窗流量分配情况。



(a) 离进口窗 20mm 处 (b) 离进口窗 50mm 处

(a) 20 mm away from the inlet window (b) 50 mm away from the inlet window

图 8 进口窗区域径向流速（无流量分配装置）

Fig. 8 Radial Flow Velocity in the Inlet Window Region (without Flow Distribution Device)

定义非均匀度常数 $NUI_{V_{r\theta}}$：

$$NUI_{V_{r\theta}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(V_{ri} - V_{rave})^2 / N}}{V_{rave}} \tag{7}$$

其中，V_{ri} 为所取位置径向速度，单位是 m/s；V_{rave} 为离进口窗 50mm 处平均径向速度，单位是 m/s；N 为所取角度上提取速度的个数。

定义相对径向速度 V_{ri}^*：

$$V_{ri}^* = \frac{V_{ri}}{V_{rave}} \tag{8}$$

表 6 给出了离进口窗 50mm 处各角度相对径向速度 V_{ri}^* 范围及非均匀度常数 $NUI_{V_{r\theta}}$。

表 6 各角度相对径向速度 V_{ri}^* 范围及非均匀度 $NUI_{V_{r\theta}}$

Table 6 Range of Relative Radial Velocity at Each Angle V_{ri}^* and Non-Uniformity $NUI_{V_{r\theta}}$

角度	相对径向速度 V_{ri}^* 范围	非均匀度 $NUI_{V_{r\theta}}$
0°	0%~143%	0.318
30°	0%~148%	0.302
45°	0%~152%	0.304
60°	0%~119%	0.219
90°	0%~153%	0.244
120°	0%~129%	0.194
135°	0%~136%	0.213
150°	0%~141%	0.228
180°	0%~151%	0.336

由表 6 可见，加入流量分配装置后，最大相对径向速度范围在 120-150%区间内，最大非均匀度小于 0.35，进口窗周向流量分配的均匀性得到了改善。

4 结论

本文对我国示范快堆蒸汽发生器钠侧入口流量分配的影响因素及特性进行了 CFD 数值仿真研究。研究发现，均流栅格高度、进口窗结构的参数均会对流量分配造成影响。通过对各因素的敏感性分析，本文提出了优化后的流量分配装置结构设计方案。为进一步评估流量分配效果，本文对有无流量分配装置的流速分布开展了对比分析，并通过速度定义非均匀度的评价指标——非均匀度常数，对流量分配装置的性能进行了定量化评估。

研究结果表明，合理调整均流栅格和进口窗设计可以改善流量分配的均匀性，从而提高热工水力性能，经过优化后的均流格栅高度为 1200 毫米，进口窗结构为 1-4 排开孔数量 40，5-8 排开孔数量 30，9-11 排开孔数量 24。加入流量分配装置后，进口窗周向及高度方向的流量分配均匀性显著提高，虽然在一定程度上增加了流动过程中的压力损失，但总体上改善了蒸汽发生器的流动特性，使最大相对径向速度范围在 120-150%区间内，最大非均匀性指数降至 0.35 以下，在径向离进口窗 50mm 位置，0°、90°、180°方向的径向流速均小于 1m/s。

这一优化方案取得了一定的流量分配数据，为我国示范快堆蒸汽发生器设计和优化流量分配均匀性提供了理论依据。未来的研究将在此基础上扩展至钠-水汽耦合流动传热分析，以进一步探讨流动均匀性对换热性能的影响，并为蒸汽发生器的工程设计提供改进建议。

作者贡献声明 王博负责设计实验；实施研究；采集数据；分析和解释数据。郭硕负责分析和解释数据；起草文章。张大林负责分析和解释数据；对文章的知识性内容作批评性审阅。田文喜负责统计分析；行政支持。秋穗正负责统计分析；行政支持。苏光辉负责统计分析；行政支持。

参考文献：

[1] 但军, 李恩, 蒋宇晨, 等. CFR600 型示范快堆蒸汽发生器关键焊接技术[J]. 东方电气评论, 2023, 37(2): 27–30. DOI: 10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2023.02.006.

DAN Jun, LI En, JIANG Yuchen, et al. Key welding technology of CFR600 demonstration fast breeder reactor steam generator[J]. Dongfang Electric Review, 2023, 37(2): 27–30. DOI: 10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2023.02.006.

[2] 张振国, 李小畅, 谭思超, 等. 钠冷快堆直流蒸汽发生器跨尺度耦合分析[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(11): 2354–2364.

ZHANG Zhenguo, LI Xiaochang, TAN Sichao, et al. Cross-scale coupling analysis of once-through steam generator of sodium-cooled fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(11): 2354–2364.

[3] 栾行健, 王文, 宋嘉豪, 等. 自然循环工况蒸汽发生器一回路流量分配特性分析[J]. 核动力工程, 2024, 45(4): 103–110. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.04.0103.

LUAN Xingjian, WANG Wen, SONG Jiahao, et al. Analysis on flow distribution characteristics of steam generator under natural circulation condition[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(4): 103–110. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.04.0103.

[4] 莫少嘉, 左超平, 姜峰. 蒸汽发生器流量分配板及横向流局部压力损失系数计算[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(6): 1039–1044.

MO Shaojia, ZUO Chaoping, JIANG Feng. Calculation of local pressure loss coefficient for flow distribution baffle and cross flow in steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(6): 1039–1044.

[5] 隋增光. 基于 CFD 的压水堆蒸汽发生器热工水力特性数值研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. DOI:

10.27157/d.cnki.ghzku.2019.000731.

SUI Zengguang. Numerical study on thermal and hydraulic characteristics of PWR steam generator based on CFD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2019.000731.

[6] 施杨, 姚彦贵, 祖洪彪. 蒸汽发生器一次侧进出口管嘴流阻的数值模拟研究[J]. 核技术, 2013, 36(12): 52-55.

SHI Yang, YAO Yangui, ZU Hongbiao. Numerical simulation study on flow resistance of steam generator primary nozzles [J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(12): 52-55.

[7] 董化平, 樊文远, 郭赟. 板状燃料组件流量分配CFD研究与优化[J]. 核技术, 2016, 39(8): 64-68. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.080603.

DONG Huaping, FAN Wenyuan, GUO Yun. CFD investigation and optimization on flow distribution of plate-type assembly[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(8): 64-68. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.080603.

[8] 张振国. 直流蒸汽发生器热工水力三维精细化模拟方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2024. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2024.000117.

ZHANG Zhengguo. Study of 3D Refined Numerical Simulation Methods for Thermal-Hydraulic of Once-through Steam Generator [D]. Harbin Engineering University. 2024. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2024.000117.[9] 刘茂龙, 刘利民, 巢孟科, 等. 小型压水堆螺旋管式直流蒸汽发生器热工水力特性试验及数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(11): 2327-2333.

LIU Maolong, LIU Limin, CHAO Mengke, et al. Experimental and numerical study on thermal-hydraulics of helical-coiled once-through steam generator of small modular pressurized water reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(11): 2327-2333.

[10] 从正. 基于多孔介质理论的核电蒸汽发器热工水力分析方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2022. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2022.002088.

CONG Zheng, Research on thermal-hydraulic analysis method of nuclear steam generator based on porous medium theory[D]. Harbin Engineering University, 2022. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2022.002088.

[11] 胡思勤, 田健, 周翀, 等. 10 MW级液态燃料熔盐堆堆芯流量分配优化设计研究[J]. 核技术, 2022, 45(11): 80-88. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110601.

HU Siqin, TIAN Jian, ZHOU Chong, et al. Optimal design of core flow distribution for 10 MW liquid fuel molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(11): 80-88. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110601.

[12] 周振华, 潘登, 陈玉爽, 等. 一种液态燃料熔盐堆堆芯流量分配设计[J]. 核技术, 2016, 39(5): 63-70. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050601

ZHOU Zhenhua, PAN Deng, CHEN Yushuang, et al. Core flow distribution design of molten salt reactor with liquid fuel[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(5): 63-70. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050601

[13] Egorov My. Vertical steam generators for VVER NPPs[J]. Nuclear Energy and Technology, 2019, 5(1): 31–38. DOI: 10.3897/nucet.5.33980.

[14] 肖常志, 杨红义, 张大林, 等. 快堆钠-水蒸汽发生器热工水力稳态综合性能研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(2): 328-336. DOI: 10.7538/yzk.2023,youxian.0386.

XIAO Changzhi, YANG Hongyi, ZHANG Dalin, et al. Study on thermal-hydraulic steady-state comprehensive performance of fast reactor sodium-water steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(2): 328-336. DOI: 10.7538/yzk.2023,youxian.0386.

[15] 白希, 孙培伟, 罗罡, 等. 钠冷快堆多模块蒸汽发生器大泄漏钠水反应事故保护系统关键参数敏感性分析[J]. 核技术, 2023, 46(12): 131-142. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120603.

BAI Xi, SUN Peiwei, LUO Gang, et al. Sensitivity analysis of large leakage sodium-water reaction protection system critical parameters with paralleling steam generators in a sodium-cooled fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(12): 131-142. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120603.

[16] 邓欣洁, 曹学武. 钠冷快堆蒸汽发生器小泄漏事故中氢迁移行为研究[J]. 核技术, 2019, 42(1): 73-77. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010603.

DENG Xinjie, CAO Xuewu. Study on hydrogen migration behavior in small leakage accident of steam generator of sodium-cooled fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(1): 73-77. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010603.

[17] 赵孝, 白宇飞, 张震, 等. 直流蒸汽发生器稳态与瞬态特性数值模拟[J]. 核动力工程, 2020, 41(6): 8–13. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.06.0008.

ZHAO Xiao, BAI Yufei, ZHANG Zhen, et al. Numerical simulation of steady-state and transient characteristics of once through steam generators[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(6): 8–13. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.06.0008.

[18] Lalot S, Florent P, Lang S K, et al. Flow maldistribution in heat exchangers, Appl. Therm. Eng., 1999, 19(8): 847-863. DOI: 10.1016/S1359-4311(98)00090-8

[19] Nguyen V T, Choi S R, Jung Y, et al. Design of perforated plate for uniform flow distribution in heat exchanger unit of SFR steam generator[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(8): 3469–3474. DOI: 10.1007/s12206-021-0719-5.

[20] Min X, Zhang D, Xu R, et al. Study on startup characteristics of prototype once-through steam generator for China fast reactor[J]. International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology, 2022, 4(1): 26-35. DOI: 10.1016/j.jandt.2022.02.003.

[21] 曾宇, 汪洪波, 孙明波, 等. SST 湍流模型改进研究综述[J]. 航空学报, 2023, 44(9): 103-134. DOI: 10.7527/S1000-6893.2022.27411

ZENG Y, WANG H B, SUN M B, et al. SST turbulence model improvements：Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(9): 103-134. DOI: 10.7527/S1000-6893.2022.27411

[22] 刘佳伦, 宁亮, 林金鹏等. 液态金属快堆螺旋管蒸汽发生器一、二次侧耦合传热数值研究[J]. 核技术, 2024, 47(9): 090605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090605.

LIU Jialun, NING Liang, LIN Jinpeng, et al. Numerical study of coupled heat transfer between primary and secondary sides of helical coiled tube steam generator for liquid metal fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(9): 090605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090605.

[23] Padmanabhan M, LeClair M L, Chandra S, et al. Flow distribution at the bottom region of a steam generator tube bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 1992, 133(1): 169–180. DOI: 10.1016/0029-5493(92)90101-Z.